

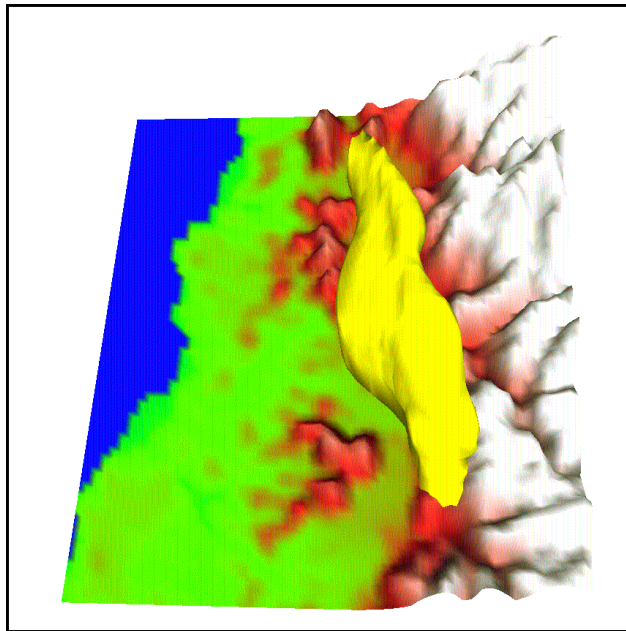
Fortalecimiento del Sistema de Información de Calidad del Aire

Área de trabajo 2: Aplicación de un modelo de escala regional a Chile central

DISPERSIÓN REGIONAL DE AZUFRE OXIDADO EN CHILE CENTRAL USANDO EL SISTEMA HIRLAM-MATCH

L. Gallardo, G. Olivares y A. Aguayo
Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile

y
J. Langner, B. Aarhus, M. Engardt y L. Gidhagen
Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología, Suecia



Penacho de dióxido de azufre (superficie de 15 ppbv) en Chile central durante un episodio tipo A a comienzos de Julio de 1999 según la simulación de HIRLAM-MATCH

DISPERSIÓN REGIONAL DE AZUFRE OXIDADO EN CHILE CENTRAL USANDO EL SISTEMA HIRLAM-MATCH

L. Gallardo, G. Olivares y A. Aguayo

Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile

y

J. Langner, B. Aarhus, M. Engardt y L. Gidhagen

Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología, Suecia

RESUMEN

Al evaluar problemas de contaminación del aire, ninguna herramienta, sin importar la exactitud y/o la complejidad de la misma, puede, individualmente, dar respuestas satisfactorias en cuanto al entendimiento de procesos y la determinación de medidas eficientes de control. Por lo tanto, como en el caso de cualquier tópico ambiental, el manejo de problemas de contaminación del aire requiere de un enfoque sistémico en el cual se aplican secuencias de herramientas que abarcan una variada gama de disciplinas y consideraciones. Los modelos de dispersión son una de las herramientas necesarias para tratar la contaminación atmosférica. Nuevamente, series o baterías de modelos pueden hacerse necesarias. Este trabajo corresponde al primer intento de evaluar la dispersión de azufre oxidado aplicando un modelo de escala regional. Este es un proyecto de cooperación entre la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI) iniciado en 1999. Varias razones justifican la aplicación de un modelo de escala regional. Cerca de un tercio de la población de Chile (alrededor de cinco millones de personas) vive en la Región Metropolitana de Santiago. Esto hace confluir industrias, transporte público y privado, consumo energético doméstico e industrial y otras actividades que dan lugar a grandes emisiones de contaminantes. Desde otras ciudades y desde algunas fuentes puntuales emanan contaminantes primarios y precursores de contaminantes. De especial interés son las grandes fundiciones de cobre: Caletones, Ventanas y Chagres, que son responsables de aproximadamente un 95% del total de emisiones de azufre oxidado en Chile central. La combinación de condiciones meteorológicas adversas a la ventilación y las grandes emisiones de contaminantes determina la ocurrencia de grandes concentraciones de los mismos lo que constituye un riesgo para la población y la vegetación. Dadas las características físicas y químicas de los contaminantes (partículas respirables, azufre oxidado, nitrógeno oxidado, hidrocarburos, ozono, etc.), éstos son susceptibles de ser transportados a escala regional, es decir, cientos de kilómetros viento abajo de las fuentes. Todas estas consideraciones hacen razonable aplicar un modelo de escala regional para determinar las influencias de distintas fuentes en la calidad del aire de esta parte de Chile. Especialmente en vista del esperado desarrollo y crecimiento de las áreas urbanas y de la infraestructura, incluyendo carreteras y redes ferroviarias, en Chile central. Implementar y evaluar una herramienta de tales características ha sido el objetivo general de este proyecto. Este proyecto ha entregado un modelo de dispersión de escala regional, una serie de conjuntos de datos meteorológicos validados que cubren varias condiciones meteorológicas típicas en Chile central, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña. También ha dado valiosas perspectivas relativas a la dispersión regional del azufre oxidado en Chile central y una evaluación de la contribución de las fundiciones de cobre a la calidad del aire de la densamente poblada Región Metropolitana de Santiago. El proyecto ha producido insumos relevantes para el establecimiento de una red regional de monitoreo. Finalmente, ha proporcionado latamente necesaria competencia en modelación de dispersión atmosférica. En suma, el proyecto ha fortalecido el sistema de información ambiental mejorando nuestro entendimiento de los intrincados procesos que gobiernan la dispersión regional de contaminantes y así nuestras capacidades de gestión ambiental para enfrentar y, ojalá, prevenir tales problemas.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han hecho esfuerzos para establecer inventarios de emisiones, redes de monitoreo meteorológico y de calidad del aire en zonas urbanas, especialmente en Santiago (33.5° S, 70.8° W). Estos datos empiezan a hacer plausible la aplicación de modelos de mesoescala y de escala regional. Aquí se presenta el trabajo correspondiente al primer intento de evaluar la dispersión regional de contaminantes de origen antrópico, especialmente de azufre oxidado, en Chile central (Ver la Figura 1) aplicando un modelo de escala regional. Este esfuerzo forma parte de un proyecto de cooperación entre la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI) iniciado en 1999, el cual se ha desarrollado en el contexto de un acuerdo de cooperación entre la Intendencia de Santiago en Chile y la Gobernación Provincial de Västra Götaland en Suecia (Ver detalles en <http://www.swe-chile.com>).

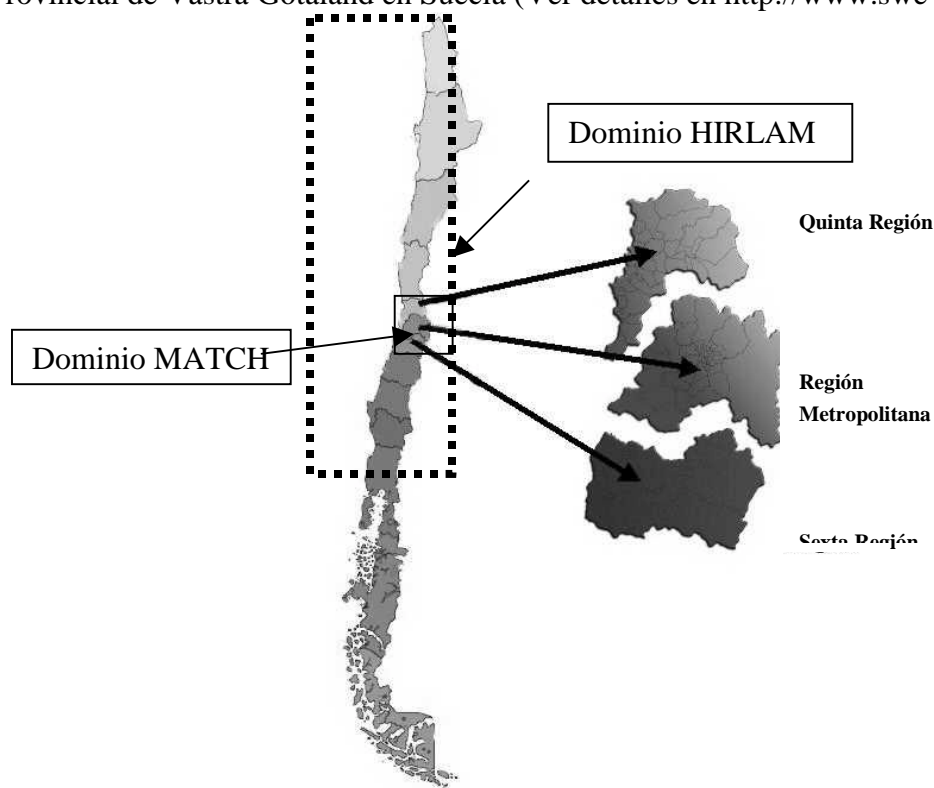


Figura 1. Regiones políticas de Chile para las cuales se ha aplicado el modelo, esto es, las regiones V, VI y Metropolitana. También se indican los dominios sobre los cuales se aplicó el sistema HIRLAM-MATCH.

Varias razones justifican la aplicación de un modelo de escala regional. Cerca de un tercio de la población de Chile (alrededor de cinco millones de personas) vive en la Región Metropolitana de Santiago. Esto hace confluir industrias, transporte público y privado, consumo energético doméstico e industrial y otras actividades que dan lugar a grandes emisiones de contaminantes. Desde otras ciudades y desde algunas fuentes puntuales emanan contaminantes primarios y precursores de contaminantes. De especial interés son las grandes fundiciones de cobre: Caletones (34°05'S, 70°27'W, 2400 m.a.s.l.), Ventanas (32°44'S, 71°29'W, 10 m.a.s.l.) y Chagres (32°40'S, 70°53', 600 m.a.s.l.), las cuales son responsables de ca. 95 % del total de las emisiones de azufre en esta zona del país. La combinación de condiciones meteorológicas adversas a la ventilación y las grandes

emisiones de contaminantes determina la ocurrencia de grandes concentraciones de los mismos lo que constituye un riesgo para la población y la vegetación (Ostro et al., 1996; Ilabaca et al., 1999; García-Huidobro et al., 2000). Dadas las características físicas y químicas de los contaminantes (partículas respirables, azufre oxidado, nitrógeno oxidado, hidrocarburos, ozono, etc.), éstos son susceptibles de ser transportados a escala regional, es decir, cientos de kilómetros viento abajo de las fuentes. Además, revisores externos del Plan de Descontaminación de Santiago han subrayado la necesidad de contar con un modelo de dispersión de escala regional (CONAMA-RM, 1999). Todas estas consideraciones hacen razonable aplicar un modelo de escala regional para determinar las influencias de distintas fuentes en la calidad del aire de esta parte de Chile. Esto es, un modelo capaz de reproducir los patrones regionales de dispersión, variaciones estacionales y tendencias de largo aliento. Implementar y evaluar una herramienta de tales características ha sido el objetivo general de este proyecto.

Evaluar la dispersión regional de los contaminantes en Chile central es un tópico complejo que requiere de variados y simultáneos esfuerzos tales como el desarrollo de inventarios de emisiones, monitoreo meteorológico y de calidad del aire y modelación de meteorología y dispersión. Al diseñar el proyecto, considerando los recursos disponibles, se decidió enfatizar sólo los aspectos de modelación a escala regional. Es decir, procesos de dispersión determinados por y a escalas de sistemas de tiempo de escala sinóptica y subsinóptica como pasos frontales y bajas costeras. Además, elegimos centrarnos en azufre oxidado pues, por una parte, es un tópico ambiental preocupante y, por otra parte, las emisiones y las concentraciones atmosféricas de azufre oxidado han sido regularmente monitoreadas en varios lugares por varios años, lo que hace más fácil acotar la validez de los resultados del modelo para azufre oxidado que para otros contaminantes. La Figura 2 muestra la ubicación de las estaciones monitoras de calidad del aire que se usaron en la evaluación del modelo así como también las principales ciudades y fundiciones mineras (La Figura también muestra la compleja topografía de la zona). Desde un principio sabíamos que las estaciones monitoras disponibles estaban diseñadas para evaluar efectos sobre la salud y que una red regional era necesaria para contar con mediciones de línea base y evaluar efectos secundarios tales como aquellos sobre la vegetación y la agricultura (García-Huidobro, 1999; García-Huidobro et al, 2000). Especialmente en vista del esperado desarrollo y crecimiento de las áreas urbanas y de la infraestructura en Chile central, incluyendo carreteras y redes ferroviarias (PRDU, 1999). Por ello, una parte de este proyecto ha sido usar las salidas del modelo para contribuir con insumos para el diseño de una red regional de monitoreo, la cual esperamos pueda ser puesta en funcionamiento en el futuro cercano.

La contaminación del aire, en sus múltiples escalas espaciales y temporales, está determinada por una serie de intrincados factores, entre otros, comportamiento humano a escalas individual y social. De tal forma, la contaminación atmosférica constituye uno de los tópicos más complejos a los que científicos, técnicos, gestores y gente en general se ven enfrentados. Dada esta complejidad, ninguna herramienta, sin importar la exactitud y/o la complejidad de la misma, puede, individualmente, dar respuestas satisfactorias en cuanto al entendimiento de procesos y la determinación de medidas eficientes de control. Por lo tanto, como en el caso de cualquier tópico ambiental, el manejo de problemas de contaminación del aire requiere de un enfoque sistémico donde se aplican secuencias de herramientas que abarcan una variada gama de disciplinas y consideraciones. Los modelos de dispersión son una de las herramientas necesarias para tratar la contaminación

atmosférica. Nuevamente, dado que la dispersión atmosférica es también un problema múltiples variables y escalas que van desde las interacciones de molécula a molécula hasta sistemas de tiempo de escala sinóptica, debe ser abordada con series o baterías de modelos. Este proyecto ha entregado un modelo de dispersión de escala regional, una serie de conjuntos de datos meteorológicos validados que cubren varias condiciones meteorológicas típicas en Chile central, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña. También ha dado valiosas perspectivas relativas a la dispersión regional del azufre oxidado en Chile central y una evaluación de la contribución de las fundiciones de cobre a la calidad del aire de la densamente poblada Región Metropolitana de Santiago. El proyecto ha producido insumos relevantes para el establecimiento de una red regional de monitoreo. Finalmente, ha proporcionado latamente necesaria competencia en modelación de dispersión atmosférica.

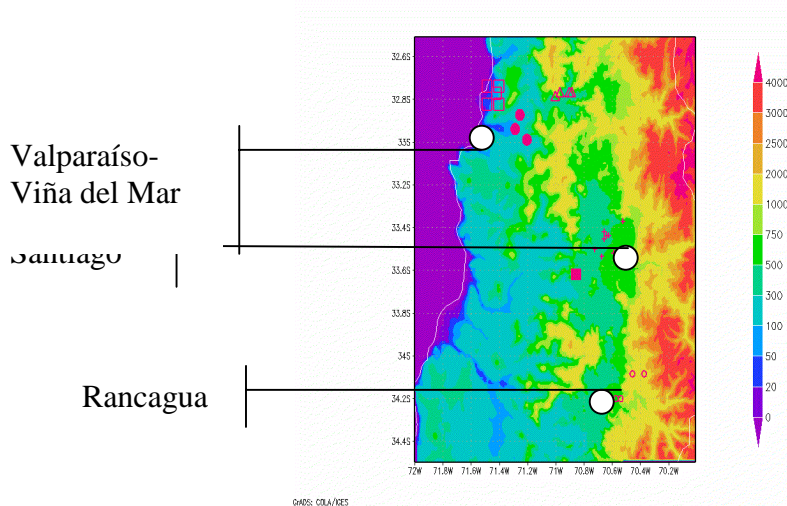


Figura 2. Ubicación de las estaciones de calidad del aire en la parte central de Chile. Las distintas redes se indican con diferentes signos: las cruces corresponden a la red de Santiago, los círculos abiertos muestran la red de Caletones, los círculos llenos pertenecen a la red de Quillota, los cuadros abiertos corresponden a la red de Ventanas, los triángulos abiertos indican la red de Chagres y el cuadrado lleno muestra la estación de Talagante. La ubicación de las principales ciudades también se muestra. La topografía del área de interés se describe con una resolución de ca. 800 m.

En la Sección 2 se destacan los tópicos abordados a través de este proyecto y así también los resultados principales. Revisamos en qué medida se han cumplido los objetivos. La Sección 3 resume las conclusiones más importantes. El lector es referido al anexo técnico para una descripción detallada de la implementación del modelo, la evaluación de las simulaciones y las conclusiones. El anexo técnico resume todos los resultados, inclusive aquellos presentados en informes preliminares.

2. APLICACIÓN DEL MODELO, EVALUACIÓN Y RESULTADOS

El objetivo principal de este proyecto se planteó como:

Implementar y poner en operación un modelo de dispersión regional con el propósito de determinar las influencias de varias fuentes en la calidad del aire de la parte central de Chile (Región Metropolitana, Regiones V y VI).

El modelo regional implementado es el Sistema de Multiescala de Modelación de Química y Transporte Multiscale (En Inglés, Atmospheric Transport and Chemistry Modeling System, MATCH) desarrollado en SMHI (Robertson et al., 1999 y referencias allí citadas). El modelo ha sido aplicado a una serie de evaluaciones ambientales y como herramienta de investigación científica incluyendo deposición de azufre y nitrógeno en Suecia, el Sudeste asiático, contaminación fotoquímica en Europa, etc. (Robertson et al., 1995; Bringfelt et al., 1997; Langner et. al., 1998; Robertson et al.1999; Engardt, 2000). Se necesitan datos meteorológicos para correr el modelo de transporte y las rutinas de deposición de MATCH. En este caso, usamos las salidas generadas por un modelo de pronóstico del tiempo tridimensional, el modelo de área limitada de alta resolución (En Inglés, High Resolution Limited Area Model, HIRLAM, <http://www.knmi.nl/hirlam/>). HIRLAM es el resultado de la cooperación entre los institutos meteorológicos en Dinamarca, Finlandia, Islandia, Irlanda, Los Países Bajos, Noruega, España y Suecia. La mayoría de los participantes usan, total o parcialmente, a HIRLAM como el modelo numérico de pronóstico del tiempo. Los datos de emisión requeridos para correr el modelo de dispersión fueron administrados a través del administrador de bases de datos AIRVIRO (<http://www.indic-airviro.smhi.se/>). La Figura 3 describe el sistema de modelación implementado para este proyecto

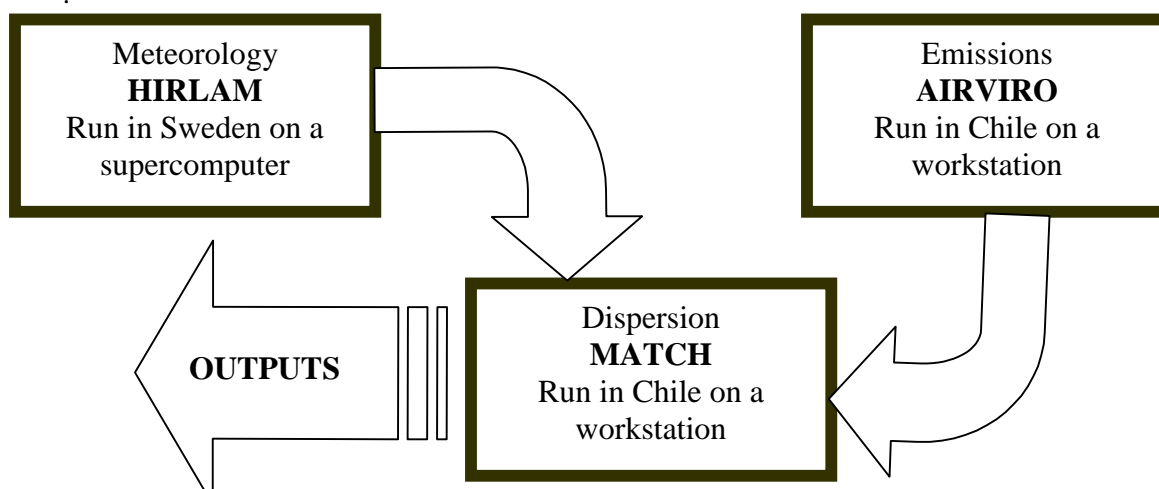


Figura 3. Esquema de la implementación del sistema de modelación.

Varios objetivos específicos fueron también propuestos al iniciar el proyecto. Aquí resumimos hasta qué punto fueron dichos objetivos alcanzados por el proyecto:

- *Determinar los campos meteorológicos (viento, temperatura, precipitación, etc.) que afectan la dispersión de contaminantes en Chile central a partir de un modelo de pronóstico de alta resolución.*

El proyecto ha entregado una serie de conjuntos de datos meteorológicos validados que cubren varias condiciones meteorológicas típicas de Chile central, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña. HIRLAM fue corrido para seis períodos de un mes de duración cada uno: Mayo-Junio 1997, Enero y Mayo 1998, Junio-Julio, Octubre y Noviembre-Diciembre de 1999. El resultado es un conjunto de datos meteorológicos validados con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial en la horizontal de 11 km que puede ser usado en una variedad de

aplicaciones. Todo esto se ilustra en las Figuras 4a y 4b. Nótese las diferencias en viento y cobertura nubosa según las distintas condiciones sinópticas típicas de verano e invierno.

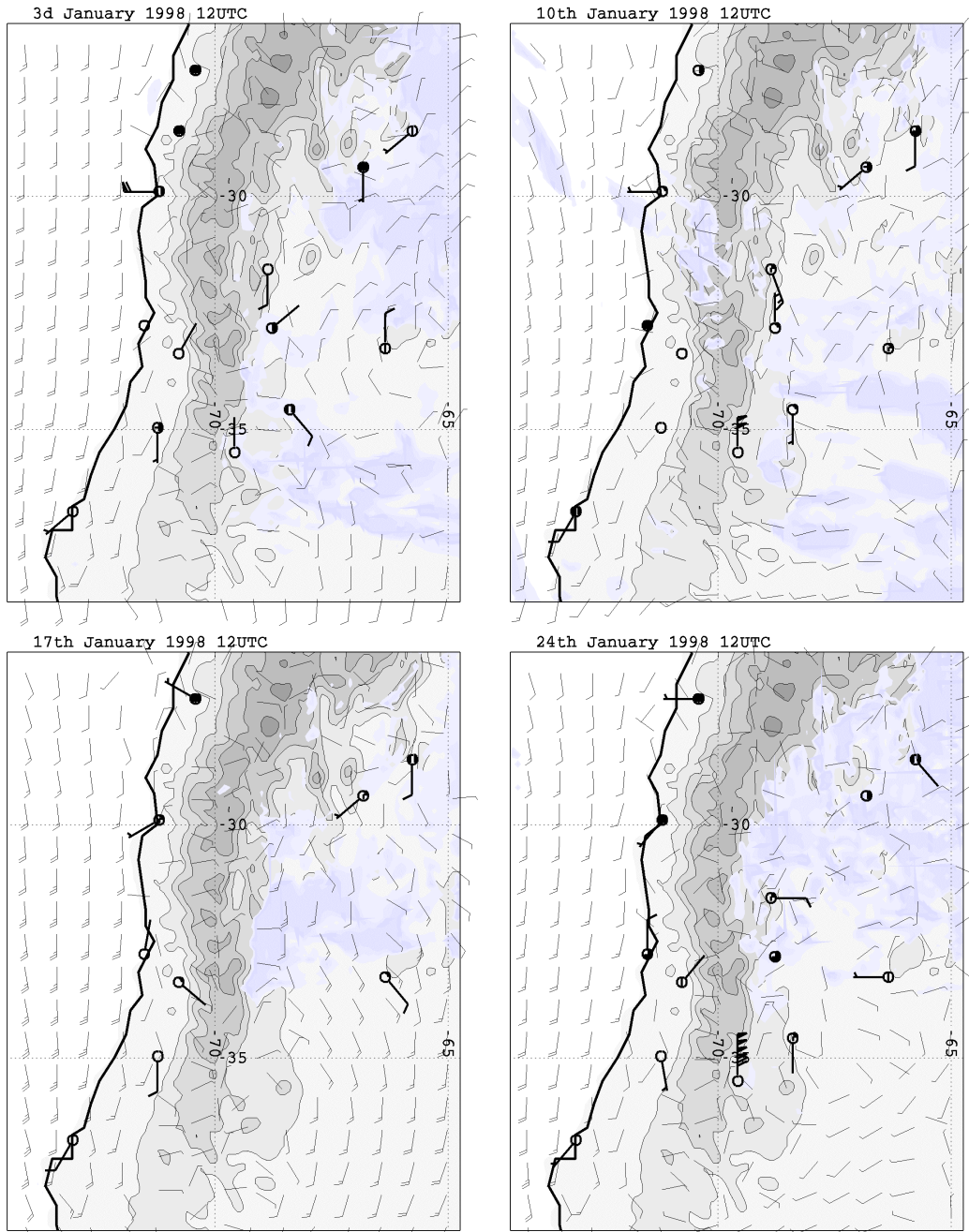


Figura 4 a) Mapas de viento en superficie (a 10 m) y cobertura nubosa según HIRLAM para cuatro ocasiones distintas en Enero de 1998. También se muestran las observaciones de viento y cobertura nubosa. La barba apunta en la dirección desde la cual sopla el viento. La rapidez se da en nudos y media barba representa 5 nudos y una entera 10 nudos (2 nudos =1m/s). Nótese que los vientos observados en la estación cercana a 35° S, 70° W parecen ser erróneos. El grado de llenado de los círculos indica la cobertura nubosa observada. Un círculo en blanco corresponde a cobertura nubosa observada nula y un círculo negro indica cielos cubiertos (ocho octas).

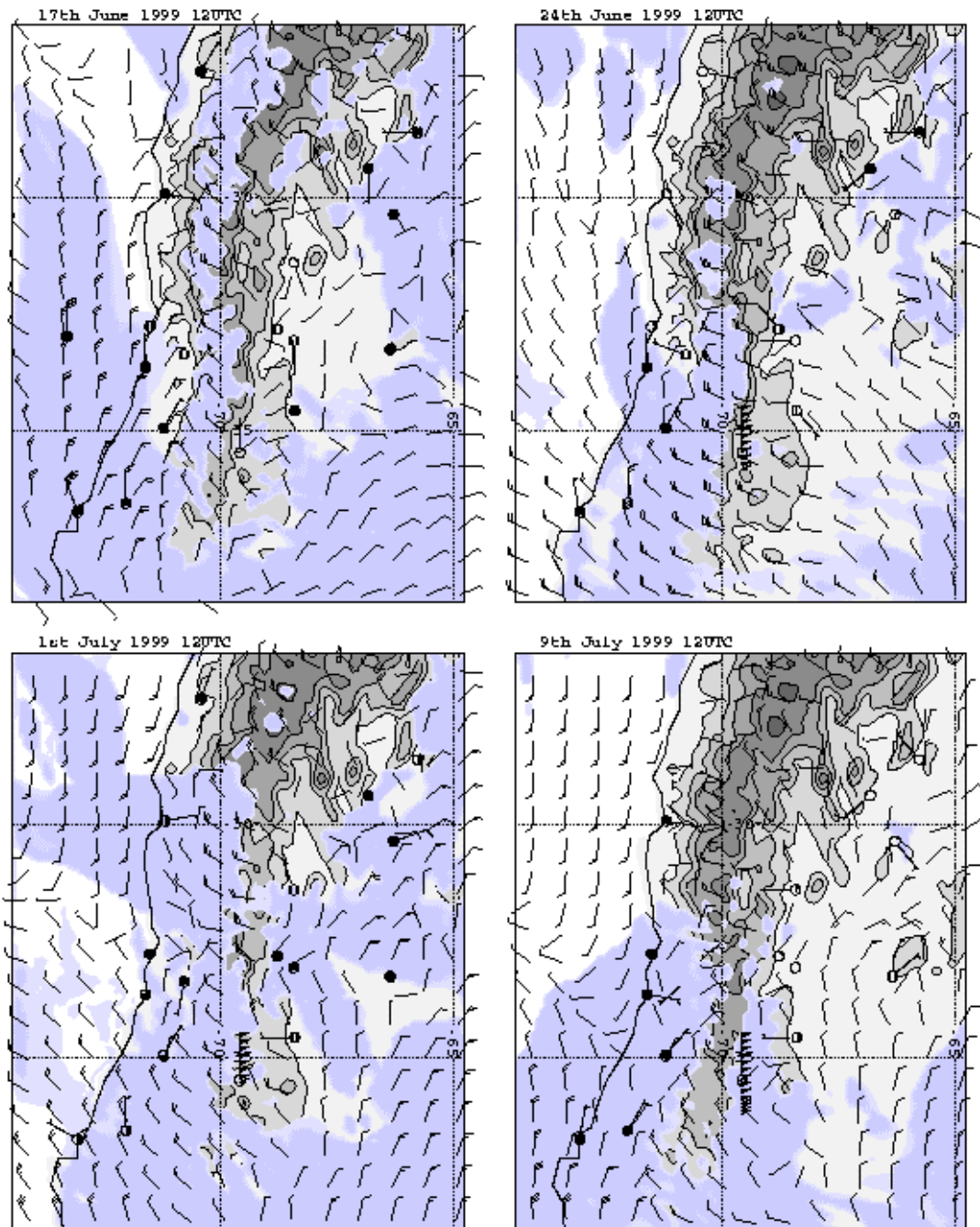
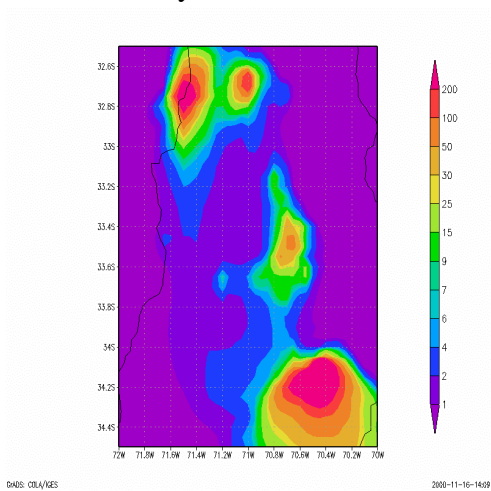


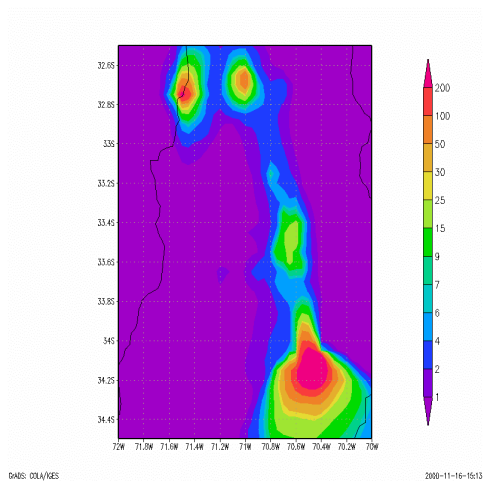
Figura 4.b) Como en la Figura 4a pero para el período Junio-Julio 1999.

- *Determinar la distribución temporal y espacial de los flujos de deposición y de las concentraciones de los contaminantes en Chile centra, incluyendo su transformación física y química.*
 - Las salidas de HIRLAM se usaron para correr el modelo MATCH para azufre oxidado, es decir, para los reservorios de azufre oxidado y sulfato. De esta manera, las concentraciones atmosféricas y los flujos de deposición y transformación de azufre oxidado han sido estudiados sobre bases anuales, mensuales, diarias y, en algunos casos, sobre bases horarias. La Figura 5a muestra el promedio mensual de las concentraciones en superficie de dióxido de azufre para: Mayo-Junio 1997, Enero y Mayo 1998, Junio-Julio, Octubre y Noviembre-Diciembre de 1999. Estos escenarios cubren una amplia gama de condiciones meteorológicas incluyendo situaciones extremas en años de El Niño y La Niña, dándoles sentido en una perspectiva climatológica y haciéndolos útiles para evaluaciones estratégicas. La Figura 5b muestra los campos correspondientes de deposición total de azufre. Estas figuras (5a and 5b) muestran que el azufre oxidado es dispersado a escala regional en Chile central, esto es, hay transporte de largo alcance de las emisiones de azufre que afectan las regiones V, VI y Metropolitana, donde vive entre un tercio el 50% de la población del país. Además, muestran que hay una marcada variación estacional en los campos de azufre oxidado. También, se ve que hay cantidades significativas de azufre que son depositadas en el área. Estos resultados hacen necesario aumentar la cobertura espacial de las actividades actuales de monitoreo y asimismo empezar una evaluación cuidadosa y detallada de los impactos sobre la agricultura y la vegetación en general. Usando los resultados del modelo, proponemos ocho nuevos lugares de monitoreo para emplazar aparatos de monitoreo atmosférico, incluyendo algunos colectores de lluvia para analizar su composición (Ver la Figura 5c). Por supuesto, estas son ubicaciones aproximadas que deben ser evaluadas *in situ*.
 - También se realizó un balance de masa sobre una base mensual y anual para un área de ca. 200x400 km² alrededor de Santiago. Este balance muestra que Chile central es una fuente neta de azufre y que el reservorio más abundante es el dióxido de azufre con ca. 95% del total del contenido atmosférico de azufre. Sólo una fracción menor (<5%) del SO₂ emitido alcanza a ser convertida a sulfato dentro del área considerada. No obstante, dado que las emisiones son tan grandes (ca. 40 kton S/a), esto junto a las emisiones directas de sulfato dan lugar a contenidos significativos de sulfato asociado a partículas finas (radios < 2.5 μm). Los cálculos de balance muestran que el mecanismo de remoción más importante es mayoritariamente la deposición seca. Sin embargo, en inviernos lluviosos, la deposición húmeda llega a ser el 50% de la deposición total. La mayor parte del azufre emitido en el área es exportado a otras zonas. Aún si el rasgo característico de la circulación atmosférica en Chile central, es decir, la Alta del Pacífico, produce un patrón general de transporte de sur a norte, una fracción importante del azufre emitido (ca. 40%) es exportado al sur de la mayor fuente puntual, vale decir, Caletones.
 - Los períodos simulados entregan perspectivas respecto de las variaciones estacionales, sinópticas y subsinópticas (interdiarias e intersemanales), incluyendo condiciones meteorológicas extremas y recurrentes, lo que los hace útiles en la definición de estrategias ambientales. Además, simulaciones de fluctuaciones cortas asociadas eventos específicos tales como las bajas costeras intensas han confirmado o dado ideas acerca de los mecanismos responsables de episodios de alta contaminación y, en general, acerca de los patrones de dispersión regional en Chile central.

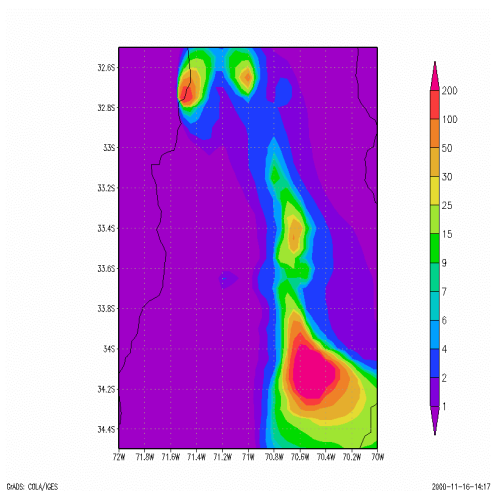
Mayo-Junio 1997



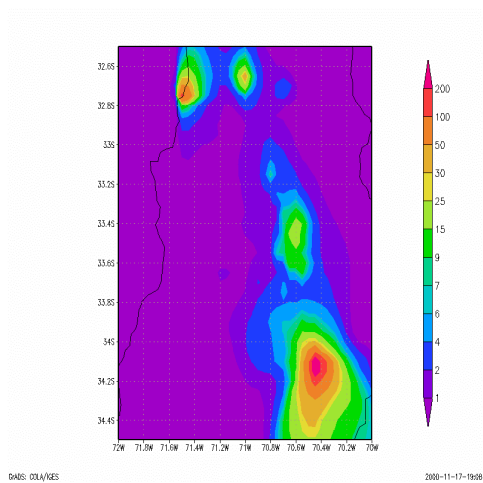
Junio-Julio 1999



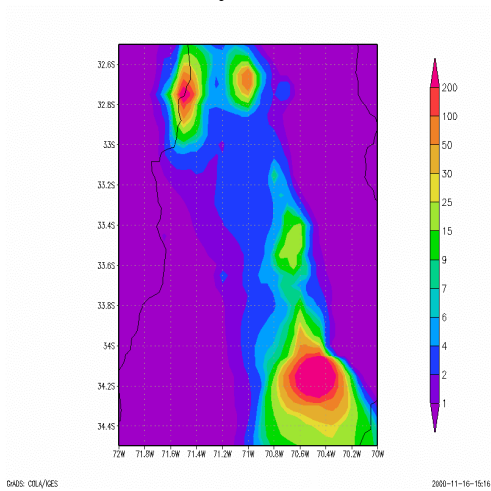
Enero 1998



Octubre 1999



Mayo 1998



Noviembre-Diciembre 1999

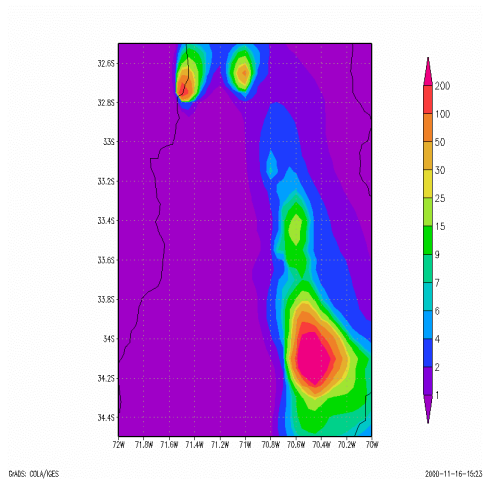


Figura 5a. Promedios mensuales de concentraciones superficiales de dióxido de azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para seis condiciones meteorológicas diferentes.

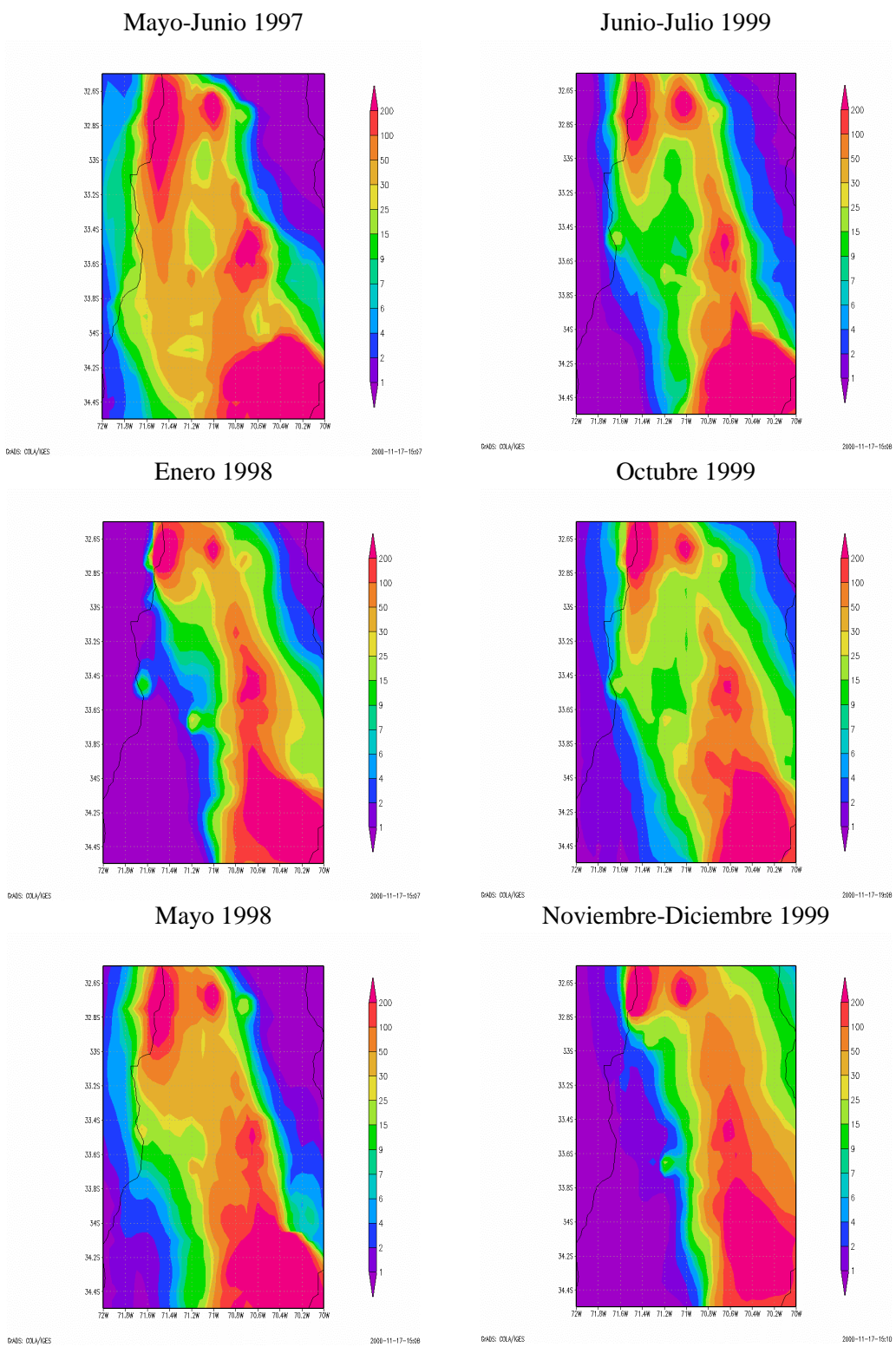


Figura 5b. Deposición total mensual de azufre (mgS/m^2) para seis condiciones meteorológicas diferentes.

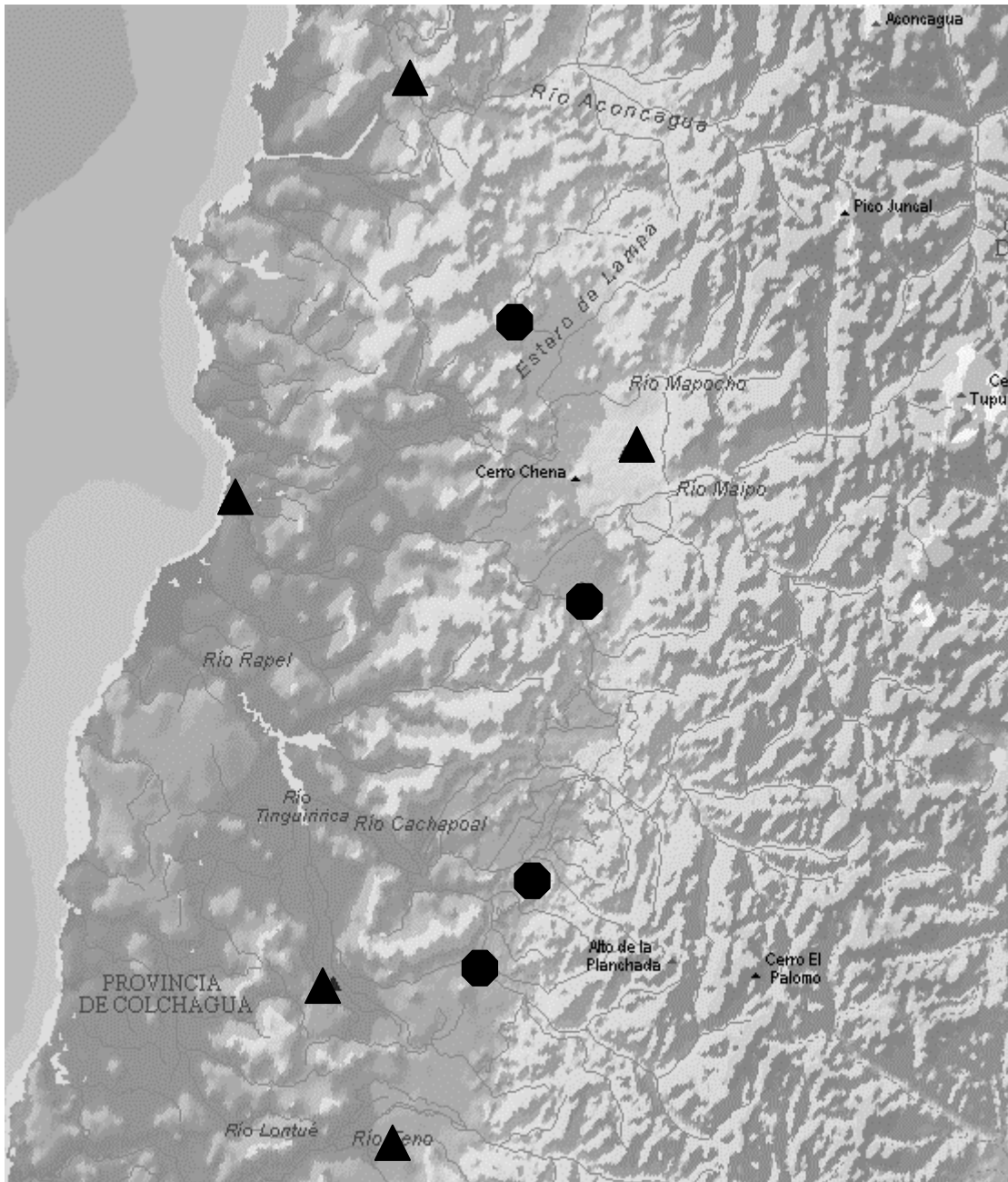


Figura 5c. Ubicación aproximada de los lugares nuevos de monitoreo propuestos. Los triángulos indican lugares donde colectores de lluvia se proponen además de instrumentos para recolectar aire; los círculos indican lugares donde se propone poner sólo instrumentos colectores de aire. Una lista priorizada puede ser encontrada en el Anexo Técnico.

- Validar las simulaciones a través de una comparación sistemática de los resultados con las observaciones disponibles.
- En cuanto a los aspectos meteorológicos, la validación de las simulaciones del modelo se ha hecho a través de una comparación sistemática de las mismas con datos de rapidez y dirección del viento y temperatura para un subconjunto de las aproximadamente 22 estaciones que han sido instaladas en la cuenca de Santiago, incluyendo un perfilador vertical en La Platina en los suburbios al sur de Santiago. Datos disponibles de estaciones sinópticas en la totalidad del dominio también han sido utilizados. La ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas se muestra en las Figuras 6a y 6b.

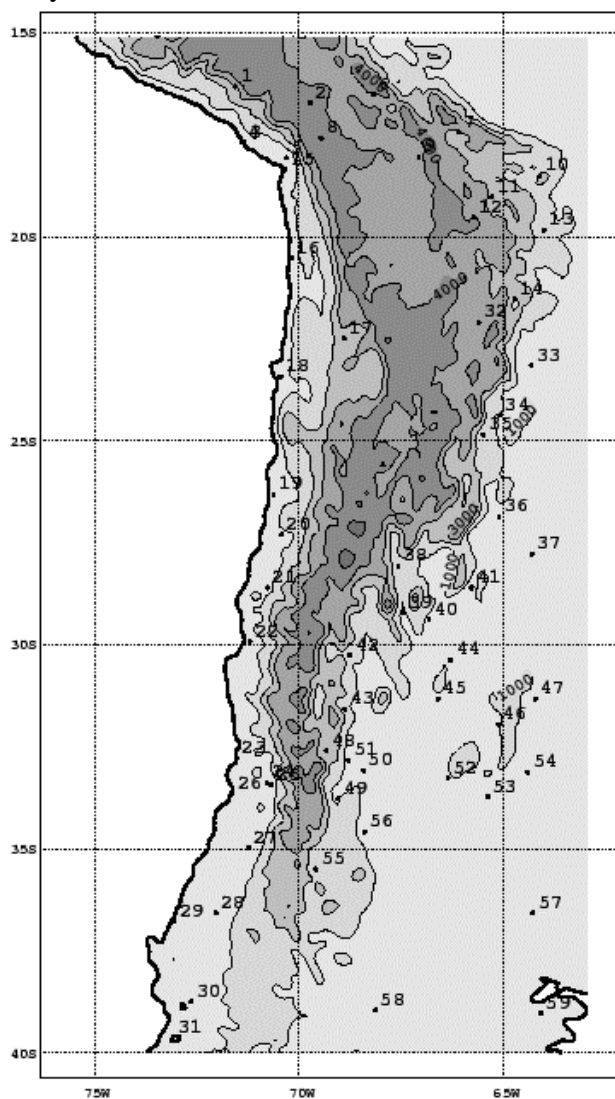


Figura 6a. El dominio del modelo y las estaciones sinópticas que reportan a la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y que se han usado para validar el modelo (Detalles en el Anexo Técnico).

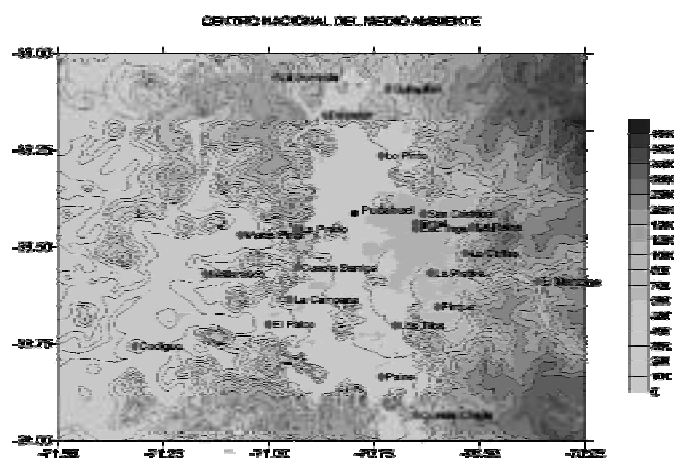


Figura 6b. Mapa de las estaciones en la zona de Santiago usadas para la evaluación del modelo. Estas estaciones son manejadas por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). Detalles en el Anexo Técnico. También se muestra en el mapa la estación Pudahuel (Estación de la OMM número 24).

- El modelo HIRLAM es capaz de describir las diferencias en patrones de viento, nubosidad y precipitación en las distintas estaciones del año, esto es, el cambio desde condiciones estivales, con marcadas variaciones diarias en rapidez y dirección del viento y temperatura en estaciones interiores, a condiciones invernales, con condiciones de cielos cubiertos asociadas a perturbaciones sinópticas (por ejemplo, pasos frontales). Además, HIRLAM captura la propagación de sistemas de altas y bajas presiones durante la mayor parte de los períodos simulados. Esto se evidencia a través de la comparación de las simulaciones con observaciones de presión en superficie, nubosidad y precipitación así también como con perfiles verticales de viento y temperatura. La principal excepción es el período de Mayo-Junio 1997, cuya simulación es deficiente. En la Figura 6c ilustramos estas características de las simulaciones mostrando una comparación entre el modelo y las observaciones en tres estaciones sinópticas en dos estaciones del año.
- También, el modelo simula adecuadamente la rapidez del viento en superficie en la zona de Santiago. Sin embargo, muestra una tendencia a sobreestimar los valores en invierno y subestimarlos en verano. Esto se relaciona con el hecho que el modelo tiende a subestimar la nubosidad baja en la región central de Chile durante el invierno. Ello ocasiona, a veces, demasiada mezcla vertical durante el día y que se sobrestimen los vientos en superficie. No obstante, esto no constituye un problema durante los episodios de contaminación pues entonces, generalmente, hay poca nubosidad. Estas características se ilustran en la Figura 6d que muestra una comparación de rapidez del viento en cuatro lugares distintos en la cuenca de Santiago. En el caso de la dirección del viento en la superficie se encuentran diferencias mayores entre las simulaciones y las observaciones. Sin embargo, estas diferencias son de la misma magnitud que las diferencias observadas entre estaciones vecinas. Esto indica que los resultados del modelo son tan buenos como pueden ser dada su resolución ($11 \times 11 \text{ km}^2$) y que efectos topográficos de pequeña escala gobiernan las diferencias en

dirección observadas. Las comparaciones con los perfiles verticales en la Platina muestran que el acuerdo entre los valores observados y modelados de dirección e intensidad del viento son mucho mejores unos cien metros sobre la superficie. Esto sostiene la conclusión que las simulaciones del modelo entregan una descripción adecuada de los patrones regionales de transporte en Chile central.

Verano (Enero 1998)

Invierno (Junio-Julio 1999)

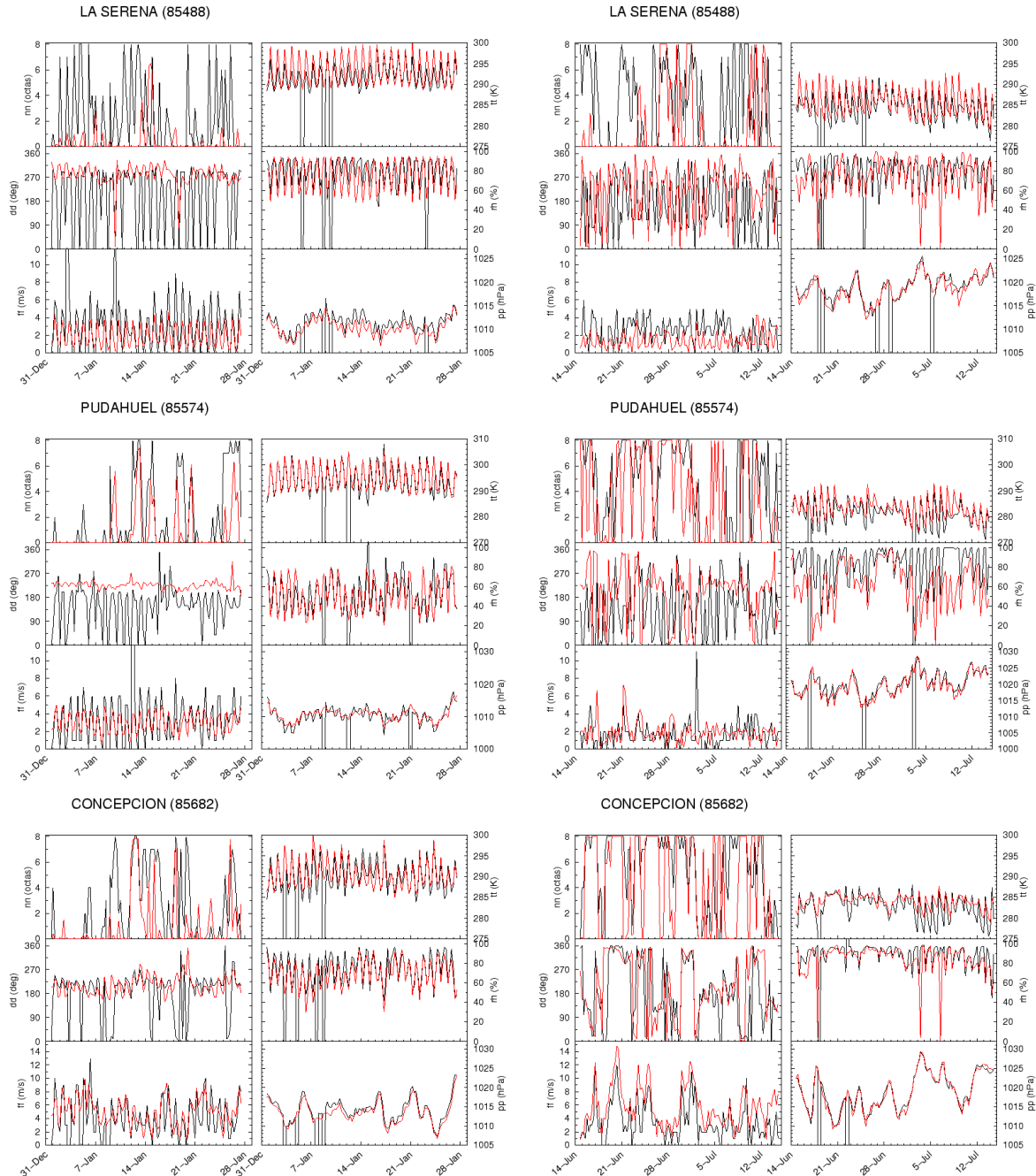
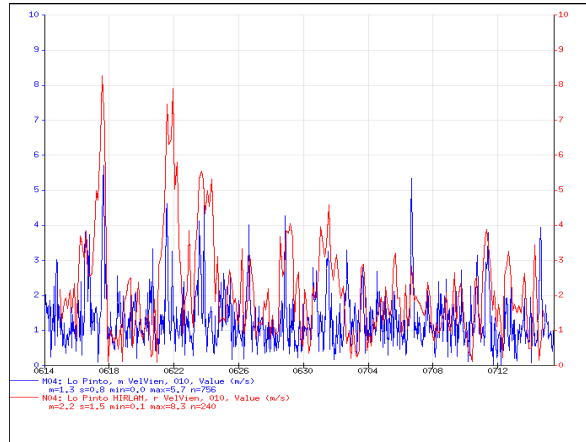
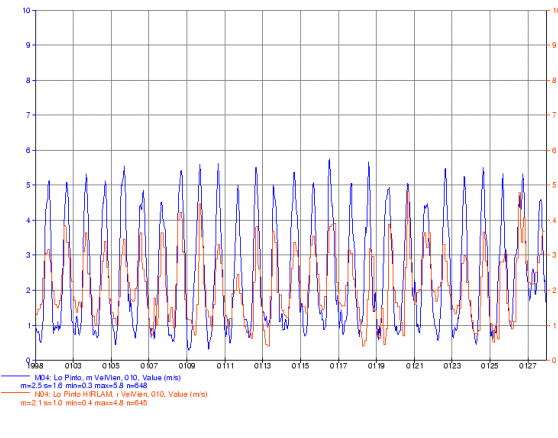


Figura 6c. Simulaciones (rojo) y observaciones (negro) de cobertura nubosa (en octas), temperatura a 2 m, dirección del viento a 10 m (grados), humedad relativa a 2 m (%), rapidez del viento a 10 m y presión en superficie reducida al nivel del mar (hPa) para tres estaciones sinópticas en la parte central de Chile en Enero de 1998 y Junio-Julio de 1999.

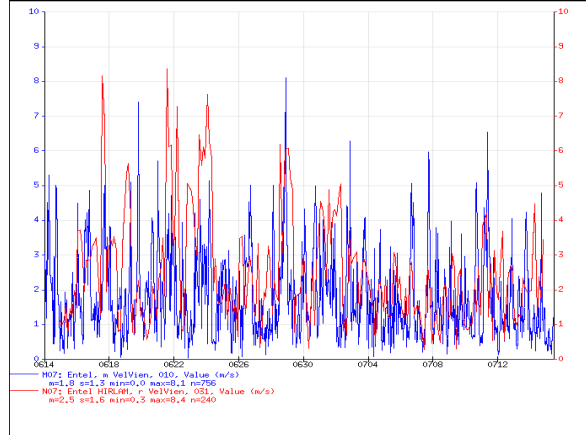
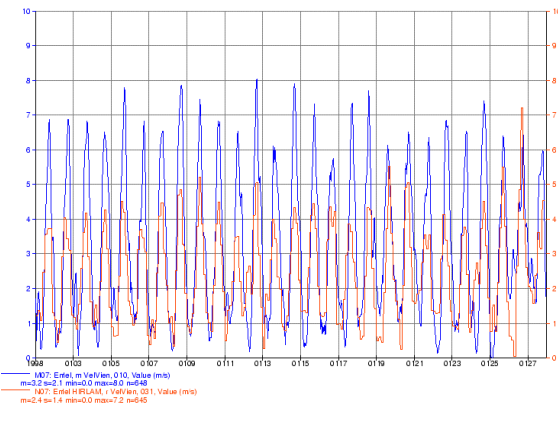
Verano (Enero 1998)

Invierno (Junio-Julio 1999)

Lo Pinto 10 m



Entel 120 m



La Platina 10 m

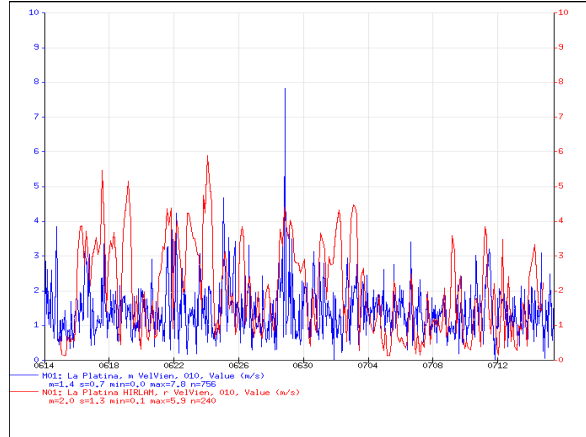
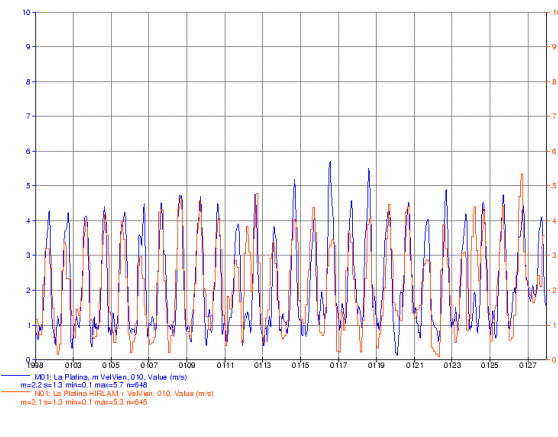


Figura 6d. Series de tiempo de valores observados (azul) y simulados (rojo) de rapidez del viento (m/s) para tres estaciones meteorológicas en la región de Santiago durante Enero de 1998 y Junio-Julio de 1999.

- El modelo es también capaz de capturar las condiciones meteorológicas durante dos episodios invernales principales en Mayo de 1998 y Julio de 1999 (bajas costeras). Estos períodos estuvieron caracterizados por condiciones muy estables y vientos leves en la zona central de Chile en conexión con la propagación de bajas costeras, los llamados episodios tipo A. Estas bajas costeras intensifican la inversión de subsidencia lo que conlleva a condiciones de dispersión y mezcla inhibidas que resultan en episodios extremos para varios contaminantes en otoño e invierno. El modelo simula las características sinópticas de dichos episodios y también las subsinópticas. Esto se ilustra en las Figuras 6e y 6f. La Figura 6e muestra los perfiles verticales (desde la superficie hasta 2 km) simulados y observados de temperatura y viento en la Platina en la cuenca de Santiago durante Junio-Julio de 1999. La Figura 6f muestra la información análoga para la estación sondeadora de Quintero, unos 100 km al noroeste de Santiago. Nótese que durante el episodio en la primera semana de Julio, la inversión se hace más intensa y los vientos se hacen más débiles que en otros períodos, con una pronunciada componente este en la capa por debajo de la inversión. De modo que el modelo confirma el patrón característico descrito por Rutllant y Garreaud (1995). Un patrón similar se encuentra en Mayo de 1998 (aquí no se muestra).

Junio-Julio 1999

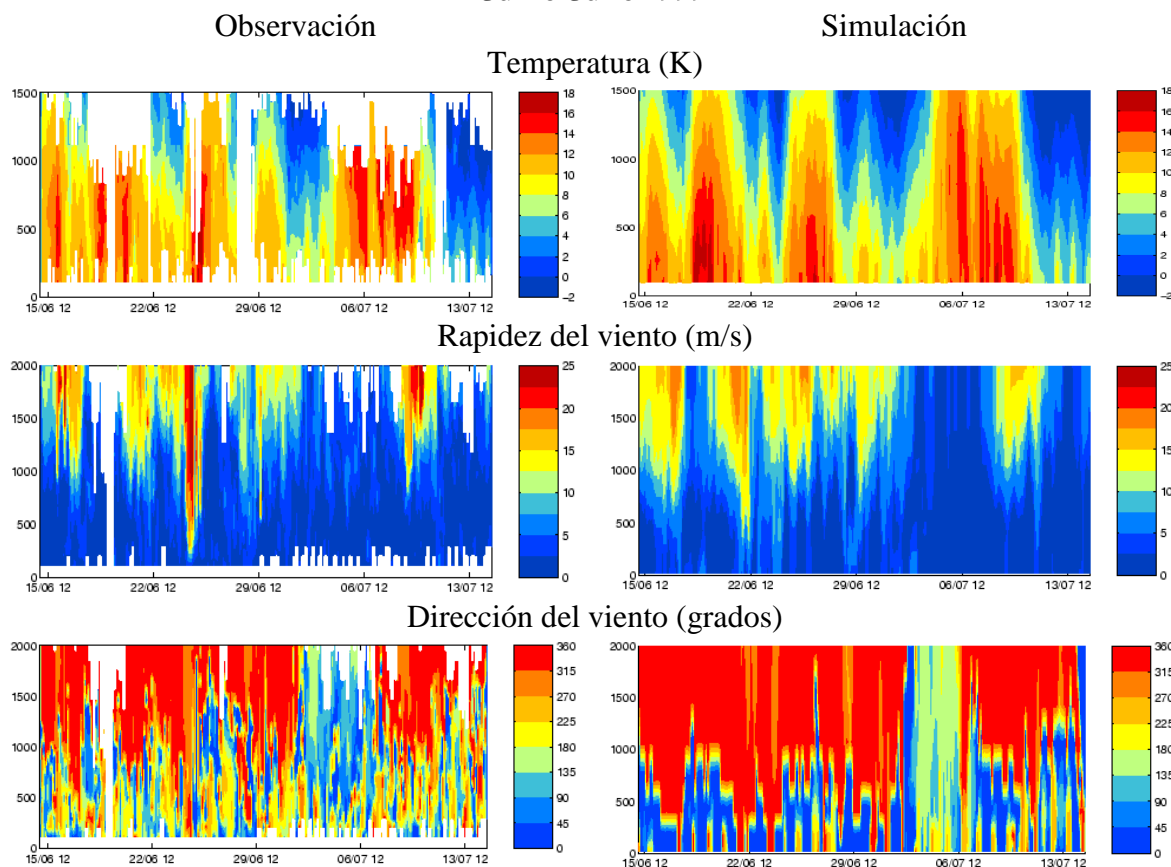


Figura 6e. Perfiles verticales de temperatura (K), rapidez (m/s) y dirección (grados) del viento según las simulaciones (paneles izquierdos) y según las observaciones (paneles derechos) de la sonda acústica de La Platina al sur de Santiago en Junio-Julio de 1999.

Junio-Julio de 1999

Observación

Simulación

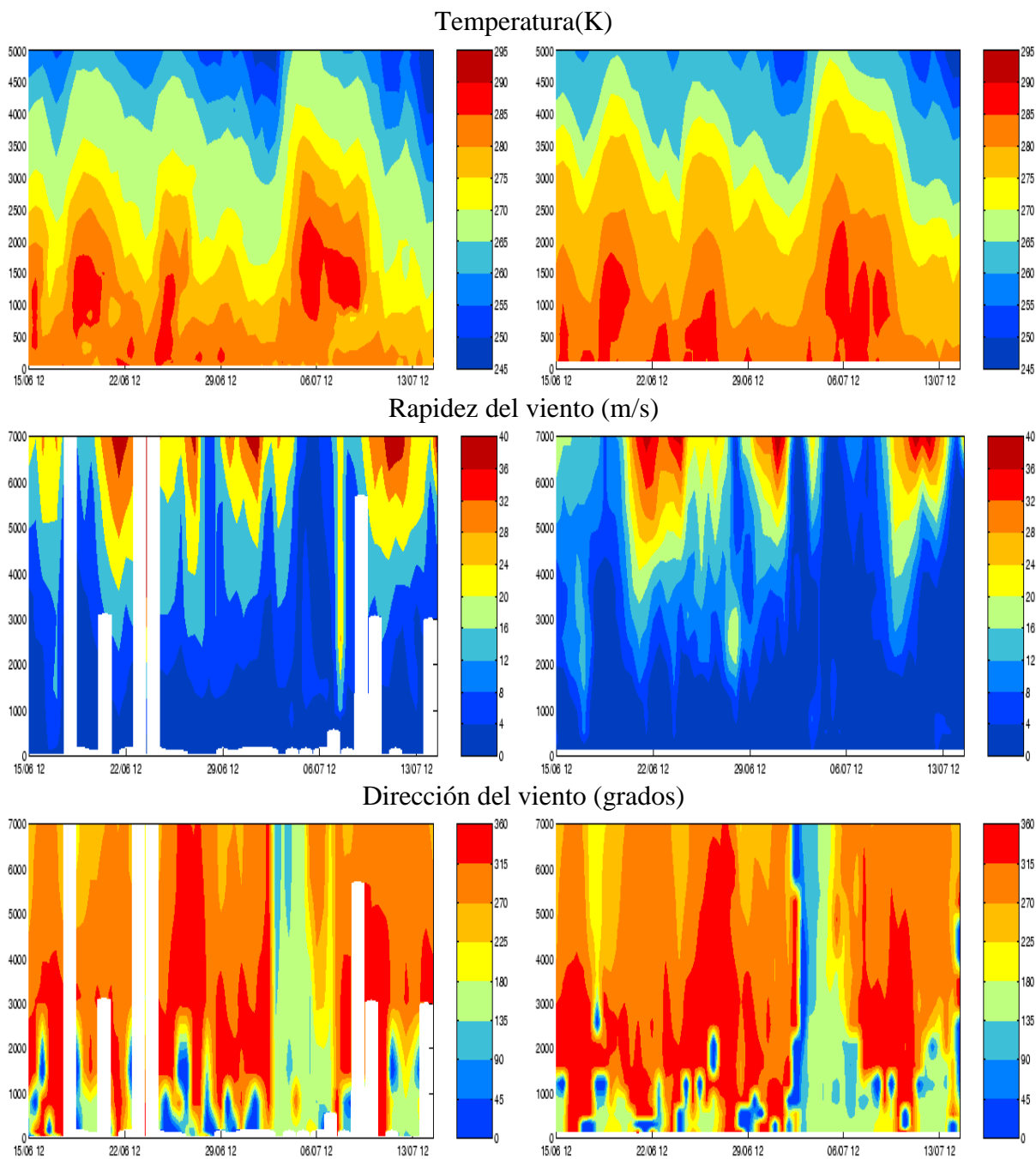


Figura 6f. Perfiles verticales de temperatura (K), rapidez (m/s) y dirección (grados) del viento según las simulaciones (paneles izquierdos) y según las observaciones (paneles derechos) de la estación sondaadora de Quintero (85543) en la costa de Chile central en Junio-Julio de 1999.

- En el caso de los contaminantes, los datos de las redes de monitoreo de Santiago y de los alrededores de los complejos industriales han sido compilados y analizados para evaluar los resultados del modelo (Ver la Figura 2). Al reunir la información encontramos una falta de análisis sistemático de los datos adquiridos a través de las mediciones. Probablemente, hasta ahora, los esfuerzos se han enfocado a temas específicos tales como episodios de alta concentración de material particulado o el cumplimiento de una norma dada y ello ha hecho que un análisis más exhaustivo y orientado a los procesos así como una descripción más detallada de los datos haya recibido menos atención. Resulta, sin embargo, muy deseable completar los datos con una descripción detallada que incluya aspectos de representatividad, tendencias, aseguramiento de la calidad, etc.. Además, hemos encontrado inconsistencias en los datos compilados en varias redes lo que hace necesario revisar y estandarizar los protocolos de compilación y de informes. También parece recomendable promover fuertes lazos entre las distintas redes de monitoreo. Esto sería útil en términos de confiabilidad de los datos y en cuanto a costos. Por supuesto, ejercicios de modelación como este ayudan a realizar tales análisis.
 - Como ya se indicó, la mayoría de las estaciones monitoras disponibles han sido emplazadas para evaluar principalmente impactos locales, sobre todo efectos sobre la salud. Por lo tanto, no se puede esperar que un modelo regional como HIRLAM-MATCH sea capaz de reproducir todas las características de dichas observaciones. No obstante, sobre una base de promedios mensuales, las simulaciones reproducen las observaciones de las concentraciones de dióxido de azufre y también la varianza de los datos en Santiago y Rancagua. Los promedios diarios de las concentraciones de SO₂ son generalmente bien capturados por el modelo en la cuenca de Santiago. También se simulan algunas características de los ciclos diarios. No obstante, ocurren discrepancias significativas en conexión con errores en la representación de los campos meteorológicos, por ejemplo cuando la cobertura nubosa es subestimada induciendo vientos superficiales exagerados (por ejemplo, en la primera mitad de Mayo de 1998) o cuando las perturbaciones sinópticas no son capturadas (por ejemplo, en Mayo-Junio de 1997). Aparte de esto, dado que la dirección del viento es pobremente simulada en condiciones de circulaciones locales que obedecen a efectos topográficos, la redistribución de las emisiones locales en la cuenca de Santiago no se simula bien. Especialmente en verano cuando los efectos topográficos se hacen más evidentes. Estas características se ilustran en la Figura 7a que muestra una comparación entre los promedios diarios observados y simulados de las concentraciones de SO₂ en el centro de Santiago en la estación de Parque O'Higgins para los seis períodos, de un mes cada uno, simulados. Se ha enfatizado la comparación con mediciones en la estación de Parque O'Higgins pues está ubicada en una zona relativamente plana de la cuenca y no demasiado cerca de fuentes puntuales lo que sugiere que es más representativa de los patrones regionales de dispersión. El mayor desacuerdo entre observaciones y simulaciones ocurre en Enero de 1998 cuando el impacto de una gran fuente puntual (una fundición de molibdeno), ubicada a sólo dos grillas de la estación es, claramente, sobrestimada en condiciones de vientos del sur que prevalecen

en ese período. El desacuerdo que sigue en importancia ocurre en Mayo-Junio de 1997 cuando la simulación meteorológica es más deficiente. No obstante, el modelo reproduce satisfactoriamente los episodios más destacados de SO_2 asociados a intensas bajas costeras que determinan condiciones de estancamiento atmosférico (Ver la Figura 7b). La Figura 7b muestra los promedios diarios según las observaciones y las simulaciones para dos episodios tipo A en Mayo de 1998 y Julio de 1999.

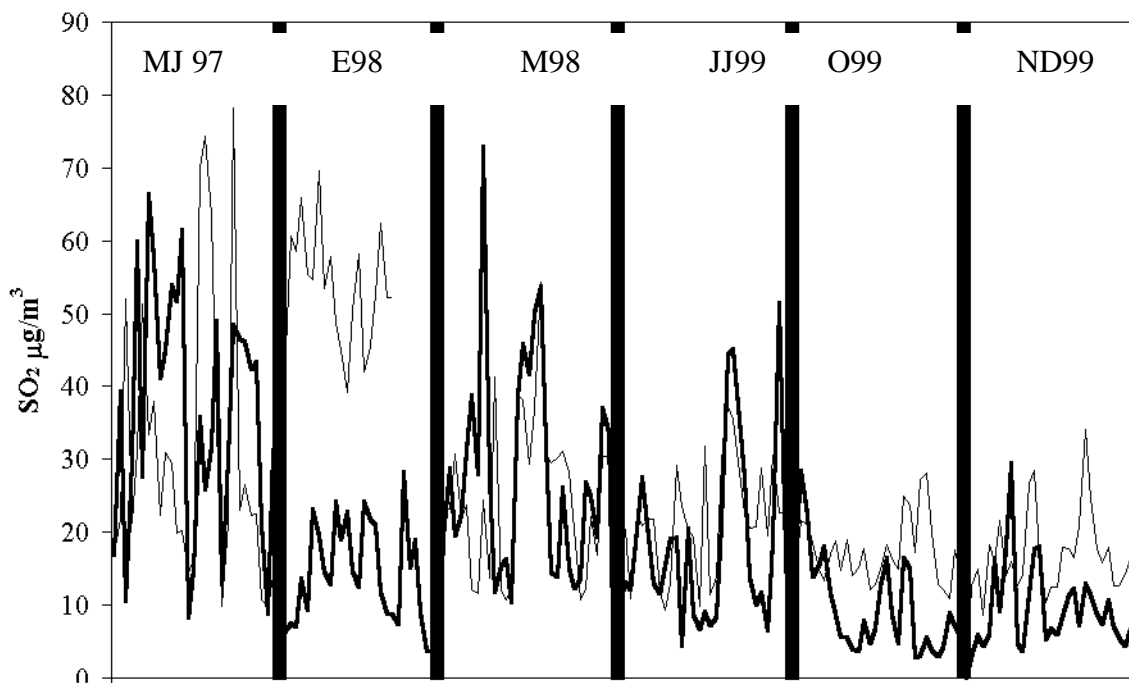


Figura 7a. Promedios diarios de concentraciones de dióxido de azufre en la cuenca de Santiago (Parque O'Higgins) para seis períodos de un mes cada uno. La línea oscura muestra las observaciones y la línea clara las simulaciones. Para detalles ver el texto.

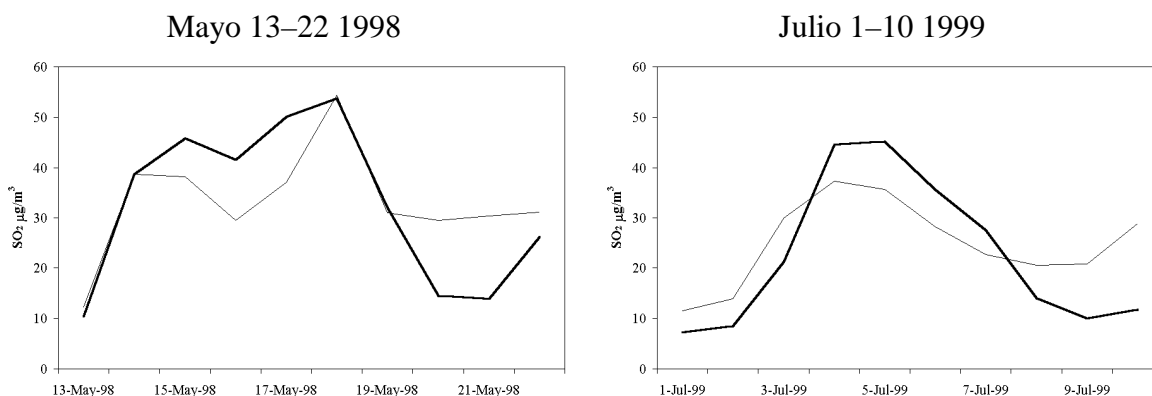


Figura 7b. Promedios diarios de concentraciones de dióxido de azufre en la cuenca de Santiago (Parque O'Higgins) para dos episodios de alta concentración (tipo A) durante Mayo de 1998 y Julio de 1999. La línea oscura muestra las observaciones y la línea clara las simulaciones.

- Las concentraciones simuladas de sulfato son consistentes con los promedios estacionales de azufre total medidos en filtros de material particulado respirable (PM_{10}) durante el invierno de 1998 en el centro de Santiago. Las simulaciones también reproducen los promedios diarios de sulfato observados durante una campaña en el invierno de 1999, en particular durante el episodio de registrado en la primera parte de Julio de 1999 (Ver la Figura 7c). De acuerdo a las simulaciones, durante este tipo de episodios aumenta la contribución de las fundiciones de cobre al contenido de azufre oxidado en la capa límite de la cuenca de Santiago, especialmente en la forma de sulfato y por lo tanto asociado a particulado fino (radios $< 2.5 \mu m$). Los resultados del modelo indican que la contribución de las fundiciones, específicamente la de Caletones, puede ser tan alta como un 50% de las concentraciones de sulfato en la cuenca de Santiago durante los episodios más intensos. La consistencia entre las concentraciones simuladas y observadas, tanto de SO_2 como de sulfato, junto a la evidencia de evaluaciones independientes (por ejemplo, Artaxo, 1998) refuerzan la idea que episódicamente hay una contribución significativa de la fundición de Caletones en cuanto a azufre oxidado y aerosoles secundarios. Una contribución similar es simulada para condiciones estivales cuando, en conexión con fuerte insolación, ocurre una intensa mezcla vertical en horas de la tarde que baja aire rico en azufre asociado al penacho de la fundición.

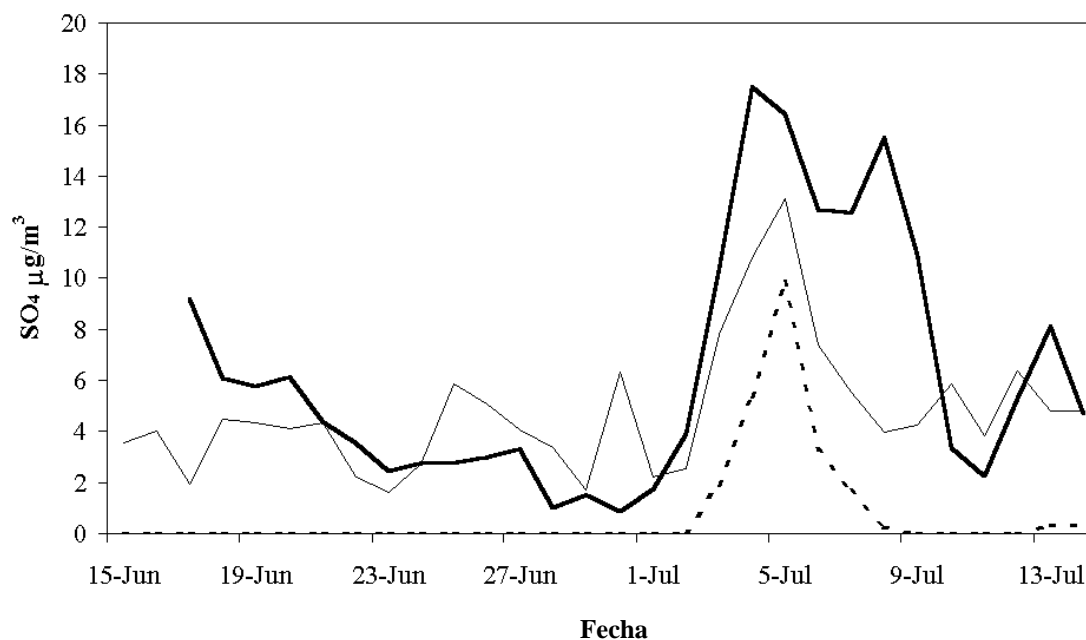


Figura 7c. Promedios diarios de sulfato en Parque O'Higgins según las observaciones (línea continua oscura) y según las simulaciones (línea continua clara). También se muestra la contribución de Caletones (línea discontinua).

- La validación de cualquier modelo es un proceso paso a paso, complejo y en algún sentido sin fin a través del cual se pondera cualitativa y cuantitativamente lo apropiado de un modelo para una serie de aplicaciones. En este estadio, no podemos decir que el modelo aplicado a estudiar la dispersión regional de azufre oxidado haya sido exhaustivamente validado. Sin embargo, el modelo reproduce consistentemente todas las características regionales que pueden ser inferidas de las observaciones disponibles. Puede ser necesario repetir que al diseñar este proyecto estábamos conscientes que las pocas observaciones disponibles de los patrones de dispersión regional no serían suficientes para hacer una validación detallada y exhaustiva de los resultados del modelo. Sin embargo, también estábamos conscientes de la enorme necesidad de contar con una red regional de monitoreo para evaluar una serie de problemas ambientales y para satisfacer los requerimientos de línea base para planificación regional. Además, sabíamos que una revisión sistemática de la información así como las perspectivas brindadas por las simulaciones serían útiles para establecer una red regional de monitoreo. Esperamos que las observaciones que recabe una red regional verificarán o falsearán estas simulaciones, resultando en mejoras de nuestro entendimiento de los intrincados procesos que gobiernan la dispersión regional de contaminantes y, así, de nuestras capacidades de gestión ambiental para enfrentar y, ojalá, prevenir dichos problemas.
- *Evaluar la contribución de diferentes fuentes antrópicas a los niveles de contaminación.*
 - Los patrones de contribución relativa de las fundiciones de cobre al contenido y la deposición de azufre en Chile central han sido evaluados para seis períodos individuales de un mes cada uno. En todos los escenarios, las fundiciones de cobre dominan la distribución horizontal y vertical de azufre en Chile central. Las emisiones urbanas, particularmente las de Santiago, afectan significativamente sólo los alrededores de la ciudad. La contribución de las fuentes urbanas en áreas rurales así como por arriba de la capa límite es menor a un 10%. De modo que si se han de tomar medidas para disminuir los impactos en la agricultura y la vegetación éstas han de relacionarse con las emisiones de las fundiciones de cobre. Asimismo, para mejorar la calidad del aire de Santiago respecto de contaminación por azufre oxidado, en el largo aliento el acento se debe poner en las emisiones urbanas.
 - Además, hemos evaluado las contribuciones de las fundiciones de cobre al contenido de azufre oxidado en la cuenca de Santiago durante episodios de unos pocos días en verano e invierno. En el verano, el impacto parece estar asociado a la fuerte mezcla vertical que ocurre en horas de máxima insolación por la tarde. En el otoño y en los inviernos secos, el impacto aparece relacionado con la configuración de bajas costeras intensas. En estas condiciones, se establece y una conexión entre la aparición en el centro de Santiago de masas de aire envejecidas, es decir, asociadas a razones de sulfato a SO₂ mayores, esto es, relacionadas con aerosoles secundarios o particulado fino (radios <2.5 μm). De tal manera que, dado el impacto significativo de Caletones en conexión con episodios de alta concentración de SO₂ y aerosoles secundarios, la influencia de

esta fuente no puede ser desatendida al discutir episodios de alta concentración de partículas en otoño e invierno.

- *Evaluar la eficiencia de las medidas contenidas en los planes de descontaminación aplicados en Chile central (Región Metropolitana, fundiciones de cobre de Caletones y Ventanas).*

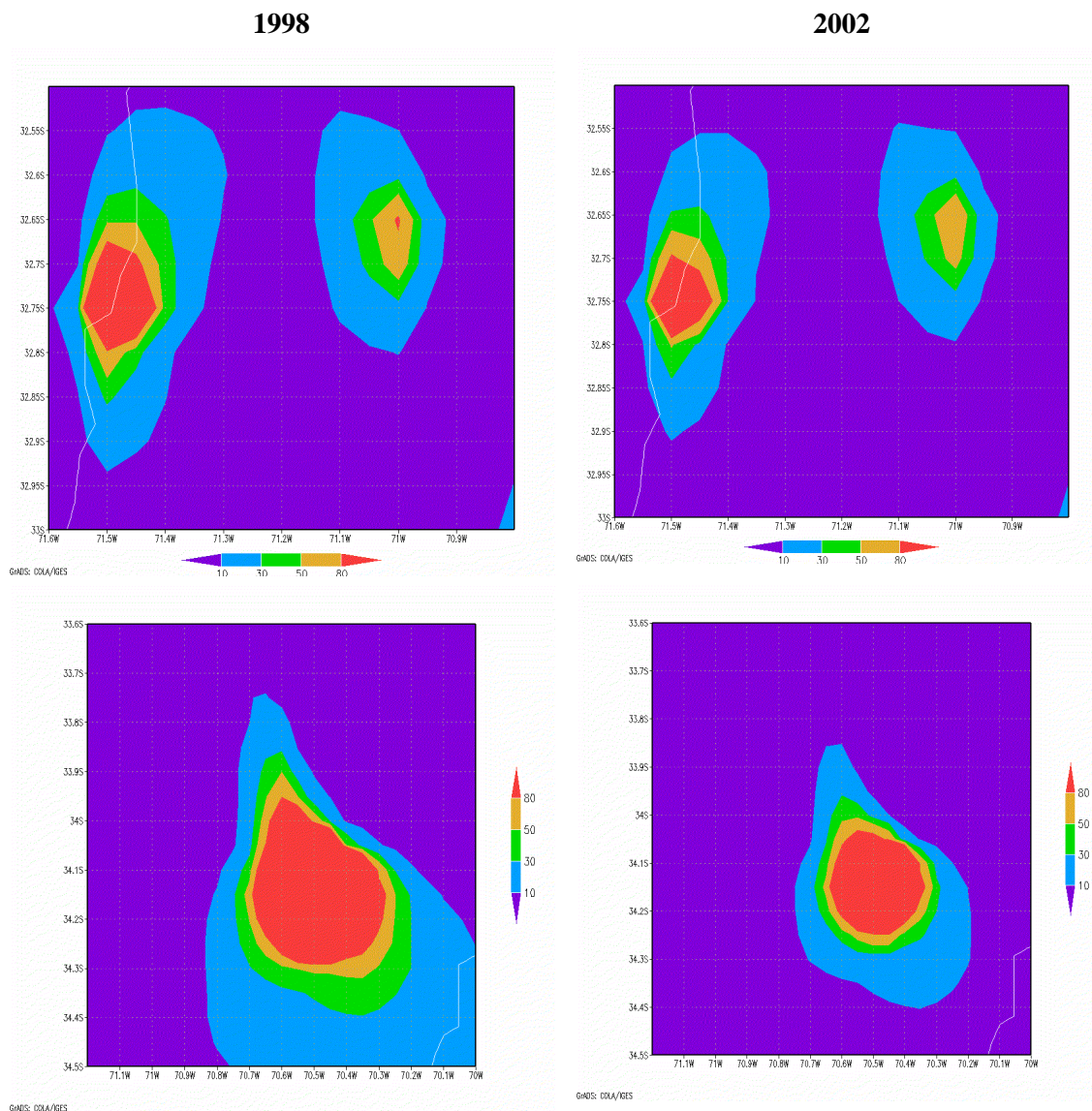


Figura 9. Distribución promedio anual de SO_2 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en superficie para dos escenarios de emisiones. Se indican las zonas con valores mayores y menores a la norma primaria vigente ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el entorno de las fundiciones de cobre. También se indica el valor de norma de la Organización Mundial de la Salud ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el límite de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendado en Europa para proteger la vegetación.

Las autoridades ambientales han implementado planes de descontaminación para las dos mayores fundiciones de cobre en el área, Caletones y Ventanas, y para la región de Santiago. Las fundiciones han construido plantas de ácido sulfúrico de modo de reducir las emisiones al aire de dióxido de azufre que resultan del procesamiento del mineral de cobre. La fundición de Ventanas ha reducido sus emisiones desde ca. 42

kton S/a en 1997 a ca. 15 kton S/a en 1999, mientras que Caletones ha implementado una reducción de ca. 30% desde ca. 370 kton S/a en 1997 a 240 kton S/a en 1999. Estos planes han mejorado la calidad del aire según lo que indican las mediciones disponibles. El plan de descontaminación de Santiago ha puesto mucho esfuerzo en la reducción de las emisiones de material particulado respirable. Esto, a su vez, ha implicado la reducción de las emisiones de azufre de calderas en procesos industriales intensos debido a la incorporación a gran escala de gas natural. Ello ha bajado las emisiones de Santiago desde aproximadamente 21 kton SO₂/a en 1997 hasta ca. 9 kton SO₂/a en 2000. Las salidas del modelo han sido utilizadas para evaluar escenarios de reducción de emisiones de acuerdo a lo contemplado en los planes de descontaminación de Caletones y Ventanas. Estos escenarios han sido evaluados respecto del cumplimiento de normas de dióxido de azufre. Como un ejemplo de dicha aplicación, la Figura 8 muestra una estimación del área afectada por concentraciones promedio anual que exceden normas ambientales para dos escenarios de emisión válidos para 1998 y 2002.

3. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La contaminación del aire, en sus múltiples escalas de tiempo y espacio, está determinada por una serie de intrincados factores, entre otros, comportamiento humano a escalas individual y social. De modo que constituye uno de los tópicos más complejos que científicos, técnicos, gestores y gente en general deba enfrentar. Dada su complejidad, ninguna herramienta, sin importar su exactitud y/o complejidad, puede individualmente dar respuestas satisfactorias respecto del entendimiento de procesos o medidas de control eficientes. Por eso, como cualquier otro tema ambiental, el manejo de la contaminación atmosférica requiere de un enfoque sistémico en el que se apliquen series de herramientas de una amplia gama de disciplinas y consideraciones. La modelación de la dispersión atmosférica es una de las herramientas necesarias para evaluar la contaminación del aire. De nuevo, dado que la dispersión atmosférica es también un problema multivariado y de múltiples escalas que van desde las interacciones de molécula a molécula hasta sistemas de tiempo de escala sinóptica, debe ser abordado con series o baterías de modelos. Este proyecto ha entregado un modelo de dispersión de escala regional, una serie de conjuntos de datos meteorológicos validados que cubren varias condiciones meteorológicas típicas de Chile central, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña. Ha entregado perspectivas valiosas respecto de la dispersión regional de azufre oxidado en esta zona del país y una evaluación de la contribución de las fundiciones a la calidad del aire en la densamente poblada región metropolitana de Santiago. Más aún ha producido insumos relevantes para el establecimiento de una red regional de monitoreo. Finalmente, ha entregado latamente necesaria competencia en modelación de dispersión atmosférica. En lo que sigue se resumen las principales conclusiones del trabajo de modelación.

Un modelo meteorológico (HIRLAM) para el área central de Chile ha sido implementado. El modelo ha sido ejecutado para seis períodos de un mes de duración cada uno en 1997, 1998 y 1999 y con ello se ha producido un conjunto de datos tridimensionales con una resolución temporal de 3 horas y 11 km en la horizontal. Basados en las comparaciones con las observaciones meteorológicas disponibles se concluye que:

- El modelo es capaz de describir las diferencias en patrones de viento, nubosidad y precipitación durante diferentes estaciones del año, esto es, el cambio desde

condiciones despejadas y pronunciadas variaciones diarias de rapidez y dirección del viento y temperatura en estaciones interiores en verano a condiciones de cielos cubiertos en invierno asociadas a perturbaciones sinópticas.

- HIRLAM captura las variaciones sinópticas (bajas y altas presiones y frentes) durante la mayor parte de los meses simulados. Esto se evidencia en las comparaciones con observaciones de presión en superficie, nubosidad y precipitación así como también en sondeos de viento y temperatura. La principal excepción es el período Mayo-Junio 1997 que es precariamente simulado.
- En particular, el modelo es capaz de capturar las condiciones meteorológicas durante los dos principales episodios invernales en Mayo de 1998 y Julio de 1999. Estos episodios estuvieron caracterizados por condiciones muy estables y vientos leves en la región central de Chile en conexión con el desplazamiento de bajas costeras, los así llamados episodios tipo A.
- El modelo tiende a subestimar la nubosidad baja en Chile central en períodos invernales. Esto induce demasiada mezcla vertical en el día y vientos demasiado intensos en superficie. Sin embargo, esto no constituye un problema durante los episodios de contaminación pues entonces la nubosidad suele ser escasa.
- El modelo es bueno en la predicción de la rapidez del viento en superficie pero con una tendencia a sobrestimar en invierno y a subestimar en verano.
- En cuanto a la dirección del viento hay mayores diferencias entre las observaciones y las simulaciones. Las diferencias entre ambas son sin embargo de la misma magnitud que las diferencias entre estaciones vecinas. Esto indica que los resultados del modelo son tan buenos como se puede esperar dada su resolución y que las diferencias identificadas se deben a efectos topográficos de pequeña escala.
- Las comparaciones de los perfiles verticales en La Platina, ubicada en los suburbios al sur de Santiago, muestran que el acuerdo entre la dirección simulada y observada del viento mejora ostensiblemente a unos 100 m sobre la superficie. La correspondencia es aún mejor al comparar niveles más altos y a 1700 m la correspondencia es excelente. Esto sostiene la conclusión que el modelo provee una buena descripción de los patrones de viento horizontales a escala regional salvo en el nivel de superficie.

Las salidas de HIRLAM se han usado para correr un modelo de dispersión, MATCH, para azufre oxidado sobre un área de aproximadamente $200 \times 400 \text{ km}^2$ alrededor de Santiago en la parte central de Chile. Los períodos simulados cubren una serie de condiciones meteorológicas típicas en Chile central, incluyendo condiciones extremas en años de El Niño y La Niña. Estos períodos entregan perspectivas relativas a las variaciones estacionales, incluyendo condiciones meteorológicas extremas y recurrentes, que los hace útiles para definir estrategias ambientales. De acuerdo a las simulaciones y a la comparación con observaciones disponibles concluimos que:

- Sobre una base mensual, las simulaciones reproducen las concentraciones promedio así como la varianza de dióxido de azufre observadas en Santiago y Rancagua. Claros desacuerdos ocurren, sin embargo, en estaciones ubicadas en las inmediaciones de las grandes fuentes puntuales, esto es, las fundiciones de cobre, en parte debido a que la resolución del modelo es insuficiente para resolver patrones locales de circulación.
- Los promedios diarios de las concentraciones de SO_2 observados son adecuadamente capturados por el modelo en la cuenca de Santiago. También se capturan algunas

características de los ciclos diarios. Sin embargo, discrepancias significativas ocurren en conexión con errores en la representación de los campos meteorológicos tales como errores en dirección del viento debido a efectos topográficos o rapidez del viento debido a efectos de cobertura nubosa.

- Las concentraciones simuladas de sulfato son consistentes con los promedios estaciones de azufre total medidos en filtros de material particulado respirable (PM₁₀) durante el invierno de 1998 en el centro de Santiago. Además, los promedios diarios observados durante una campaña en el invierno de 1999 también están en buen acuerdo con las simulaciones.
- Según las simulaciones, el azufre oxidado es dispersado regionalmente en Chile central, es decir, hay un transporte de gran alcance de las emisiones de azufre que afectan a las regiones V, VI y Metropolitana donde vive entre un tercio y 50% de la población del país.
- El predominio de las fundiciones de cobre como contribuidoras al contenido de azufre oxidado en Chile central ha sido mostrado de acuerdo a las simulaciones de MATCH. En todos los escenarios, las emisiones de las fundiciones de cobre dominan las distribuciones horizontal y vertical de azufre en Chile central. De modo que si se han de tomar medidas para evitar o disminuir los impactos sobre la agricultura y la vegetación, éstas deben relacionarse a las emisiones de las fundiciones de cobre.
- Las fundiciones de cobre contribuyen episódicamente al contenido de azufre oxidado en Santiago. En el verano, el impacto parece relacionado con la fuerte mezcla vertical que ocurre en horas de máxima insolación por la tarde. En el otoño y en inviernos secos, el impacto aparece relacionado con la fuerte y generalizada subsidencia asociada a la configuración de bajas costeras intensas (episodios tipo A). Hay una conexión entre el impacto episódico de las fundiciones de cobre y la aparición en Santiago centro de masas de aire envejecidas con razones mayores de sulfato a SO₂ ratios, es decir, asociada a aerosoles secundarios o particulado fino (radios < 2.5 µm).
- Las emisiones urbanas, particularmente las de Santiago, afectan significativamente sólo el entorno de la ciudad. La contribución de las fuentes urbanas en zonas rurales así como por encima de la capa límite se estima menor a 10%. Por lo tanto, para mejorar la calidad del aire de Santiago respecto de azufre oxidado en una perspectiva de largo aliento uno debe centrarse en disminuir las emisiones locales. No obstante, dado que existe un impacto de Caletones en conexión con episodios de alta concentración y aerosoles secundarios, la influencia de esta fuente no puede ser desatendida, particularmente al discutir particulado fino y episodios de contaminación.
- Se ha presentado una primera evaluación del balance de azufre oxidado en Chile central, es decir, sobre un área de ca. 400x200 km² alrededor de Santiago. Este balance muestra que Chile central es una fuente neta de azufre y que el reservorio más abundante de azufre es el dióxido de azufre con ca. 95% del total del contenido atmosférico de azufre. Sólo una fracción menor (<5%) del SO₂ emitido es convertida a sulfato dentro del área considerada. No obstante, dado que las emisiones son tan grandes (ca. 40 kton S/a), esta conversión junto a las emisiones primarias de sulfato resultan en contenidos significativos de sulfato estrechamente ligado a particulado fino (radios < 2.5 µm).
- Los cálculos de balance muestran que el mecanismo de remoción largamente más importante es la deposición seca. Sin embargo, en inviernos lluviosos, la deposición húmeda puede llegar a ser un 50% de la deposición total.

- La mayoría del azufre emitido es exportado fuera del dominio del modelo. Aún si el patrón característico de la circulación atmosférica de Chile central, es decir, la Alta del Pacífico, produce un patrón de transporte generalizado de sur a norte, una fracción significativa del azufre emitido (ca. 40%) es exportado al sur de la mayor fuente puntual, vale decir, Caletones.
- Estos resultados hacen necesario ampliar la cobertura espacial de las actuales actividades de monitoreo e iniciar un análisis detallado y cuidadoso de los impactos sobre la agricultura y la vegetación tanto en el área considerada en este estudio como al sur de ella. Este planteamiento es apoyado en una evaluación de riesgo recientemente publicada por García-Huidobro et al. (2000).
- Hemos usado las simulaciones del modelo que cubren una amplia gama de situaciones meteorológicas para proponer la instalación de instrumentos monitores de calidad del aire, incluyendo algunos colectores de lluvia, en ocho nuevos lugares. Por supuesto, la ubicación de estos lugares es sólo aproximada y debe ser evaluada *in situ*.

Aquí hemos presentado la primera evaluación de la distribución regional de azufre oxidado de origen antrópico en Chile central usando un modelo de escala regional. Este sistema de modelación así como los resultados entregados hasta aquí pueden ser útiles para una serie de problemas ambientales que deben enfrentarse en Chile central, donde vive aproximadamente un 50% de la población del país y donde la agricultura es una importante actividad. Especialmente en vista de las necesidades de planificación de largo aliento que exige el esperado y continuado crecimiento y desarrollo urbano y de infraestructura en Chile central, incluyendo carreteras interregionales e infraestructura ferroviaria. Además, esta herramienta puede ser utilizada en otras zonas de Chile, especialmente en la zona norte, para abordar importantes temas ambientales. El mismo sistema ha sido de hecho empleado para evaluar la dispersión de arsénico en Chile central y norte. En suma, este proyecto ha fortalecido el sistema de información de calidad del aire y mejorado nuestro entendimiento de los intrincados procesos que gobiernan la dispersión regional de contaminantes y, por ello, esperamos que mejore nuestra capacidad de gestión ambiental para enfrentar y, ojalá, prevenir dichos problemas. Prevemos que un manejo adecuado de los problemas de dispersión regional requerirá de una actividad coordinadora en la que las actividades de modelación y monitoreo se integren estrechamente. Dicha actividad debiera ser parte de una estrategia regional amplia que, usando un enfoque sistémico y de largo aliento, pueda definir medidas eficientes de control y prevención.

AGRADECIMIENTOS. Este proyecto es parte de un acuerdo de cooperación entre la Intendencia Metropolitana de Santiago y el Gobierno Regional de Västra Götaland en Suecia. El trabajo se financia a través de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y la Agencia Sueca de Cooperación para el Desarrollo (ASDI).

REFERENCIAS

- Artaxo, P., 1998. "Aerosol Characterization Study in Santiago de Chile Wintertime 1998". National Commission for the Environment, Metropolitan Region.
- Bringfelt, B., Backström, H., Kindell, S., Omstedt, G., Persson, C., Ullerstig, A., 1997: Calculations of PM-10 concentrations in Swedish cities-Modelling of inhalable particles. SMHI RMK Report N°76.
- CONAMA-RM, 1997: Plan de prevención y descontaminación atmosférica de la Región Metropolitana. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana de Santiago.
- CONAMA-RM, 1999: Auditoría del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la región Metropolitana (<http://www.conama.cl>). Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana de Santiago.
- Engardt, M., 2000: Sulphur simulations for East Asia using the MATCH model with meteorological data from ECMWF. SMHI RMK Report N°88.
- García-Huidobro, T., 1999. "A Risk Assessment of Potential Crop Losses due to Air Pollution in the Central Regions of Chile". Imperial College of Science, Technology and Medicine. University of London, Centre for Environmental Technology.
- García-Huidobro, T., Marshall, F., Bell, J., .2000: A risk assessment of potential crop losses due to ambient SO₂ in the central regions of Chile. *Atmos. Environ.* Accepted for publication.
- Ilabaca, M., Olaeta, I., Campos, E., Villaire, J., Tellez-Rojo, M., Romieu, I., 1999: Association between Levels of Fine Particulate and Emergency Visits for Pneumonia and other Respiratory Illnesses among Children in Santiago, Chile. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 49:PM-154-163
- Langner, J., Bergström, R. and Pleijel, K., 1998. "European Scale Modeling of Sulfur, Oxidized Nitrogen and Photochemical Oxidants. Model Development and Evaluation for the 1994 Growing Season". SMHI RMK Report N°82.
- Ostro, B., Sánchez, J.M., Aranda, C., and Eskeland, G.S., (1996), Air Pollution and Mortality: Results from a Study of Santiago, Chile, *J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol.*, 6 (1), 97-114.
- Robertson, L., Rodhe, H., Granat, L., 1995: Modelling of sulphur deposition in the Southern Asian region. *Water, Air and Soil Pollution*, 85, 2337-2343.
- Robertson, L., Langner, J., and Engardt, M. 1999: An Eulerian limited-area atmospheric transport model. *J. Appl. Met.* 38, 190-210.
- Rutllant, J. and Garreaud, R., 1995: "Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Episode Forecasting". *Environmental Monitoring and Assessment*, 34, 223-244.
- PRDU, 1999: Anteproyecto Plan Regional de Desarrollo Urbano y Territorial Región Metropolitana de Santiago, Memoria Explicativa. Intendencia Regional Metropolitana de Santiago, Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo.